

文章编号:1671-6833(2024)04-0095-07

粤港澳大湾区复合灾害系统暴露度评估

黄莉^{1,2}, 王芸清³, 王伟^{2,3}, 宋月^{2,3}, 石雨欣³

(1. 河海大学 公共管理学院, 江苏 南京 211100; 2. 河海大学 海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了针对性地预防和降低复合灾害给城市带来的灾害损失, 对于链式复合灾害系统暴露度开展研究具有重要的理论实践意义。通过对链式复合灾害系统暴露度的研究分析, 综合考虑现有研究并界定了复合灾害系统暴露度的内涵, 推导建立了链式复合灾害系统暴露度评价模型和计算方法。以粤港澳大湾区暴雨-滑坡灾害链为例进行实证分析, 从人口、经济、社会等方面筛选构建区域灾害链暴露度评估指标体系, 运用序关系分析和 TOPSIS 法计算得到湾区 52 个区县的暴雨、滑坡单一灾害暴露度指数, 进而运用构建的链式复合灾害系统的暴露度理论模型和 ArcGIS 得到粤港澳大湾区暴雨-滑坡灾害链暴露度区划图, 并根据各区域灾害链暴露度属性提出相应的灾害防范化解重大风险应对措施。研究结果表明: 经济发达地区对应的暴露度指数显著高于其他地区, 低暴露度区集中在经济相对落后的地区, 各指标中人口密度和地均 GDP 占主体地位, 对地区暴露度的影响最高。通过对区域复合灾害系统暴露度的评估, 可以为政府和相关部门提供合理的科学依据和决策支持, 帮助政府、城市规划和公众更好地了解 and 应对灾害风险, 从而减少灾害的损失和影响。

关键词: 复合灾害; 粤港澳大湾区; 暴露度评估; 序关系分析; TOPSIS 法

中图分类号: X43; X915.5 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2024.01.013

近年来极端气象事件频发。随着地处风险易发区的人口和资产的逐步增加, 自然灾害带来的风险和损失也逐渐增大, 给人类生产生活与社会经济活动带来的影响不断加深^[1]。极端气候和灾害已逐渐成为造成重大伤亡或财产损失的重要因素^[2], 很多沿海城市遭受的风暴潮、咸潮等暴雨灾害^[3-4]与洪水、内涝等气候灾害以及地面塌陷、滑坡等衍生地质灾害通过风险传递产生了叠加效应, 形成了复杂的灾害链, 导致灾害引起的损失更为严重, 损失面更广。

暴露度表达及量化是衡量城市受自然灾害影响程度的重要指标, 也是社会经济损失及风险评估的重要手段^[5]。因此, 通过评估区域灾害暴露度、探究灾害链暴露度的叠加机理, 从而有针对性地探讨降低和控制城市灾害损失的措施, 已经成为维护城

市安全和保障城市经济社会健康发展的重大战略任务。

国外学者们对暴露度的研究内容主要集中在暴露度空间分布模式和影响暴露度变化的原因等方面。Polisky 等^[6]提出了 VSD (暴露-敏感-适应) 模型, 将暴露度作为评估系统脆弱性的一个重要标准; Tellman 等^[7]使用高分辨率的卫星图像数据, 评估 2000—2018 年 913 次大洪水事件的洪水范围和人口暴露情况, 指出受洪水影响的人口暴露度将进一步增加。而中国的研究主要集中在灾害和极端天气事件下的经济暴露度、人口暴露度等。Sun 等^[8]对不同升温情景下的海河流域人口暴露度进行了研究; 王艳君等^[9]从范围、人口、经济和农作物 4 个维度展开暴露度评估。

综合来看, 在灾害风险分析方面, 现有研究中大

收稿日期: 2023-09-01; 修订日期: 2023-10-08

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFC3001002); 国家自然科学基金资助项目 (71974052)

作者简介: 黄莉 (1982—), 女, 陕西汉中, 河海大学副教授, 博士, 主要从事复合灾害应急管理研究, E-mail: lily8214@126.com。

通信作者: 王伟 (1979—), 男, 湖北天门人, 河海大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事复合灾害应急管理研究, E-mail: 13813826667@163.com。

引用本文: 黄莉, 王芸清, 王伟, 等. 粤港澳大湾区复合灾害系统暴露度评估[J]. 郑州大学学报(工学版), 2024, 45(4): 95-101. (HUANG L, WANG Y Q, WANG W, et al. Exposure assessment of compound disaster system in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2024, 45(4): 95-101.)

部分是将暴露度作为脆弱性的一部分对地区的脆弱性进行评估分析,小部分研究单独将地区暴露度作为研究对象展开研究。而在分析区域暴露度的研究中,以往的研究多是针对单一灾种下的地区选取多个指标分离式评估暴露度,或是从单一影响因素(如人口、经济等方面)考虑开展研究,且多以定性研究为主,较少考虑复合灾害情景下灾害链触发叠加等效应,以及从人口、经济、社会等方面综合分析的区域复合灾害暴露度量化研究。因此,本文在前人研究的基础上,基于对暴露度内涵的界定,从串联式触发灾害链的角度,考虑灾害叠加(折减)效应系数,推导出适用于链式复合灾害系统的暴露度理论模型。以粤港澳大湾区暴雨-滑坡灾害链为例,从人口、社会、经济等方面筛选构建暴露度评估指标体系,量化测算各区域暴雨、滑坡单一灾害暴露度指数;运用构建的链式复合灾害系统的暴露度理论模型和 ArcGIS 得到粤港澳大湾区暴雨-滑坡灾害链暴露度区划图;根据各区域灾害链暴露度提出相应的灾害风险防范化解应对措施,为我国华南沿海地区复合灾害系统的防治提供重要理论支撑。

1 研究区概况

粤港澳大湾区地处珠江流域下游,漫长的海岸线、错综分布的丘陵、盆地、台地、平原形成相对闭合的“三面环山、一面临海、三江汇流、八口出海”的独特地形地貌。台风-风暴潮-洪水-内涝和咸潮灾害链、台风-暴雨-洪水-内涝和衍生地质灾害链两条典型灾害链内部又存在相互触发叠加关系,形成灾害复杂网络。粤港澳大湾区灾害链作用机理图见图 1。



图 1 粤港澳大湾区复合灾害机理示意图

Figure 1 Schematic diagram of compound disaster mechanism in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

气候条件方面,粤港澳大湾区内珠江三角洲属亚热带湿润季风气候,各大支流汛期错开,但夏秋

多台风,洪涝威胁大。湾区地势起伏较大,人类活动生产生活较为密集,洪涝、台风、崩滑流、地面沉降等自然灾害频发。受气温上升和极端天气影响,近年来,大湾区降水呈现降水量增加、降水日数减少但暴雨日数增多等特征^[10],强对流天气及短时强降雨成为常见的致灾天气,几乎每年都会造成人员伤亡和巨大经济损失。如大湾区 2022 年 5 月出现了极端暴雨过程,珠海、江门、中山等地出现了特大暴雨,各种气象灾害共造成直接经济损失约 15.12 亿元,造成 4 人死亡。湾区独特的气候优势与气候风险并存,尤其是气候变化背景下极端降水强度进一步增强,暴雨洪涝灾害风险不断增加,而在汛期又频遭暴雨侵袭并由此导致内涝、洪灾、山体滑坡等衍生灾害^[11],复合灾害作用下大湾区可能面临巨大的损失。

社会经济发展方面,粤港澳大湾区是中国当前重点建设的重要区域之一,湾区内创新资源高度集聚,经济发展态势良好。但细化到各区县,人口聚集程度和经济发展存在较大的差异,总体特征表现为人口总体基数大、人口空间分布不均等特点,中部和南部沿海地区经济发展较好,西部和东部地区相对落后。

综上所述,由于粤港澳大湾区典型的气候条件和差异性的经济分布,各区县物理暴露水平差异较大。研究粤港澳大湾区各区县物理暴露度等级水平,有助于应急管理部门采取措施针对性地减少灾害损失,对湾区经济发展具有十分重要的意义。

2 研究方法

暴露度指暴露在致灾因子影响范围内的受灾体的数量或价值,是造成灾害风险的必要条件^[12-13]。Clark 等^[14]认为暴露度和应对能力(再细分为抵抗力、恢复力)一起是组成脆弱性概念的元素。本文将暴露度的内涵界定为受到灾害影响的人文社会体系,包括人口、财产、工程设施等受灾体的数目、构成、价值和布局。它反映的是受灾体遭遇灾害或危险的程度,决定了受到自然灾害影响的受灾体的潜在损失程度。

首先,假定灾害链为单纯串联式触发灾害链 C_n , 具体为 $D_1 \rightarrow D_2 \rightarrow \dots \rightarrow D_n$ 。其中, D_1 为初生灾种,可能触发 D_2 灾种, D_2 灾种进而可能触发 D_3 灾种, \dots , D_{n-1} 灾种可能触发 D_n 灾种,即灾害链 $C_n = \{D_1 \rightarrow D_2 \rightarrow \dots \rightarrow D_n\}$ 。

灾害链 C_n 中第 i 个灾种 D_i 至第 j 个灾种 D_j 也构成一个灾害链 ${}_iC_n$, 是灾害链 C_n 的一个子集,即

$${}^jC_n = \{D_i \rightarrow D_{i+1} \rightarrow \cdots \rightarrow D_j\}, {}^jC_n \in C_n。$$

复合灾害系统暴露度评估相对于单灾种下的暴露度评估,其区别主要体现在灾害叠加(折减)效应系数的有无。

设灾害链 ${}^{j-1}C_n$ 触发第 j 个灾种 D_j 的叠加(折减)效应系数为 g_j , 是灾害事件对地区的影响进行量化评估时引入的参数,可以用于计算整体灾害损失。基于此,本文用灾害链 jC_n 造成的灾害损失相对于灾害链 ${}^{j-1}C_n$ 、 jC_n 分别造成的灾害损失之和的比值估算叠加(折减)效应,即 $g_j = {}^jC_n$ 的灾害损失/ $({}^{j-1}C_n$ 的灾害损失+ jC_n 的灾害损失)。通过灾害叠加(折减)效应系数的引入对复合灾害暴露度进行量化评估。由此得到复合灾害系统暴露度评估模型如下。

用 jA_n 表示由 D_1 灾种触发形成的灾害链 jC_n 的暴露度,由灾害链 ${}^{j-1}C_n$ 的暴露度 ${}^{j-1}A_n$ 和灾害链 jC_n (即第 j 个单一灾种)的暴露度 jA_n (也可表示为 ${}_jA_n$) 推导得到:

$${}^jA_n = ({}^{j-1}A_n + {}_jA_n)g_j。$$
 (1)

对于 2 个灾害构成灾害链的特例,灾害链 2C_n 的暴露度表示为

$${}^2A_n = ({}_1A_n + {}_2A_n)g_j。$$
 (2)

式中: ${}_1A_n$ 、 ${}_2A_n$ 分别表示单一灾害 D_1 、 D_2 的暴露度指数。

由上述模型可知,复合灾害系统暴露度的评估是建立在单灾种的区域暴露度评估结果之上的。

3 实证分析

考虑到湾区频遭暴雨侵袭,易引发地质灾害隐患点发生滑坡灾害,在选择复合灾害时,以较为典型的暴雨-滑坡灾害链为例进行分析研究。根据复合灾害系统暴露度评估模型推导,以粤港澳大湾区暴雨-滑坡灾害链为例,构建复合灾害系统暴露度评估指标体系,评估得到各区县暴露度指数,并据此针对性地提出湾区防灾减灾建议措施。

3.1 指标体系构建

本研究基于指标选取的综合性、系统性、代表性、客观性和科学性等原则,依照前述的暴露度内涵以及以往研究中涉及的暴露度指标^[9-14]对评价指标进行筛选。考虑到暴雨-滑坡灾害链在系统暴露度的评价指标选取时具有一般性,最终,从人口、社会、经济 3 方面构建粤港澳大湾区暴雨-滑坡灾害链暴露度评价指标体系,过滤掉相关性明显、显著性水平过低、对准则层影响较小的指标,具体如表 1 所示。

表 1 暴雨-滑坡灾害链暴露度评估指标体系
Table 1 Rainstorm-landslide disaster chain exposure assessment index system

目标层	准则层	指标层
灾害链暴露度	社会	A1:居住用地占比
		A2:工业用地占比
		A3:道路密度
	人口	B1:人口密度
		C1:耕地占比
		C2:地均 GDP

注:本实证研究中,考虑到数据可得性,对于暴雨单一灾害、滑坡单一灾害、暴雨-滑坡灾害链暴露度评估均采用表 1 指标体系,在实际操作中,可以针对各个单一灾害补充该灾种暴露度的特性评估指标,即不同单一灾种采用不同的暴露度评估指标体系。

3.2 评估步骤

3.2.1 数据和标准化处理

指标数据来源如下:居住用地占比、工业用地占比、耕地占比 3 项指标数据从中国科学院资源环境科学与数据中心提供的矢量图提取数值得到;地均 GDP、道路密度两项指标数据来源于 2020 年的《广东省统计年鉴》^[15];人口密度指标数据来源于第七次全国人口普查统计结果。

将收集到的各区县的指标数据制成 excel 表格,导入 ArcGIS 软件结合区县分布图利用“连接与关联”表格操作制成矢量图,并利用内嵌的自然断点法按指标数值进行分级处理。

3.2.2 权重和综合评价指数计算

鉴于暴露度评估中指标体系的特殊性,即不同灾种对应相同的指标体系,不同灾种的区分体现在指标权重的差异性,因此,对于单灾种的暴露度评估,本文选取主观赋权法确定权重优先级,再以客观方法进行赋值处理。经过分析比较,选取序关系分析法^[16]进行计算。序关系分析法通过确定评估指标之间的序关系和确定相邻指标之间的重要程度来赋予权重,计算方法简便、直观且不需要构造矩阵^[17],相比于层次分析法,不仅简化了过程,而且无须进行一致性检验,具有更高的可操作性和直观性。其主要步骤如下。

(1)确定指标之间的序关系。根据各评价指标的重要性程度确定各指标间的序关系。若评价指标 R_i 相对于 R_j 重要,则记为 $R_i > R_j$,按照这种排序方法可以得到一个关系式;

(2)确定相邻指标之间的重要性标度值。设专家对于评价目标的 2 个相邻指标 R_{n-1} 和 R_n 重要程度之比为 r_n ,则有

$$r_n = \frac{\omega_{n-1}}{\omega_n} \quad (3)$$

式中： ω_n 为第 n 个指标的权重系数， $n = 2, 3, \dots, N$ 。 r_n 越大表示指标 R_{n-1} 相比于指标 R_n 更重要。

(3) 根据各指标间的重要性标度值，依据式(4)、式(5)分别计算它们的权重系数，可以得到各指标权重向量 $\mathbf{W} = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N]$ ，其中：

$$\omega_n = (1 + \sum_{n=2}^N \prod_{i=n}^N r_i)^{-1}; \quad (4)$$

$$\omega_{n-1} = r_n \omega_n \quad (5)$$

确定权重后，利用 TOPSIS 法计算系统暴露度综合评价指数。假设该指标评价系统有 m 个目标、 n 个特征量，计算步骤如下。

步骤 1 由各特征量的原始数据 $x_{ij}(i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$ 和正、负参照点形成初始判断矩阵 \mathbf{X} ，归一化处理得到规范化矩阵 \mathbf{Y} 。

步骤 2 结合各指标权重 \mathbf{W} ，计算得到加权判断矩阵 \mathbf{Z} ，并根据 \mathbf{Z} 求待评估对象的正、负理想值 z_i^+ 和 z_i^- ，然后计算 \mathbf{Z} 中各元素与正、负理想值间的欧氏距离 Ed_i^+ 和 Ed_i^- 及相对贴近度 P_i ：

$$\begin{cases} Ed_i^+ = \sum_{j=1}^n (z_i^+ - z_{ij})^2; \\ Ed_i^- = \sum_{j=1}^n (z_i^- - z_{ij})^2. \end{cases} \quad (6)$$

$$P_i = \frac{Ed_i^-}{Ed_i^+ + Ed_i^-} \quad (7)$$

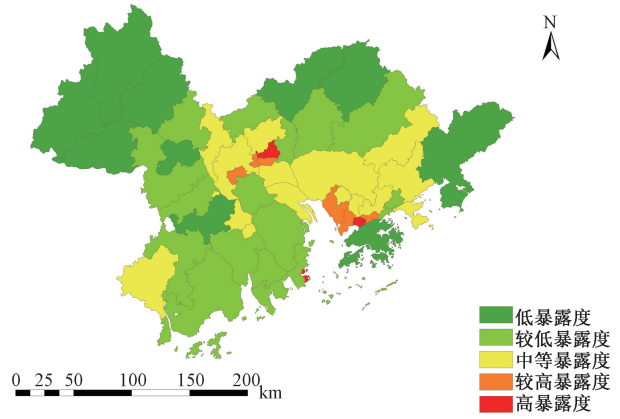
步骤 3 由贴近度值进行灾害系统暴露度评估。

3.3 粤港澳大湾区暴雨-滑坡灾害链系统暴露度评估

3.3.1 暴雨灾害暴露度评估

由式(3)~(5)计算得到各指标权重，由式(6)、(7)计算得到粤港澳大湾区 52 个区县暴雨灾害下的受灾体暴露度指数，并利用 ArcGIS 内嵌的自然断点法进行分级，绘制如图 2 所示粤港澳大湾区暴雨灾害暴露度区划图。

由图 2 可知，高暴露度区域集中在澳门特别行政区、广州市越秀区、天河区和深圳市福田区。其中，越秀、天河和福田区的地均 GDP 指数较高，意味着发生灾害时影响同等面积的区域时这 3 个区遭受的损失更大、暴露度高；同时，越秀、天河和福田区的居住用地占比高、人口密度大，灾害发生造成人员伤亡的可能性更大，因此人口暴露度高。澳门耕地面积较少，地均 GDP 处于中等水平，但经济支撑来自



注：该图基于中国科学院资源环境科学与数据中心网站的标准地图制作，底图无修改，数据来源于资源环境科学数据注册与出版系统^[18](下同)。

图 2 粤港澳大湾区暴雨灾害暴露度区划图

Figure 2 Rainstorm disaster exposure zoning map of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

于出口加工业、旅游博彩业、建筑地产业和金融保险业，当地并无太多的制造业产业，易于遭受复合灾害带来的经济损失也更大；同时，澳门的道路密度很高，车流量相应更多，灾害发生时人员和经济的损失都会随之增大，暴露度高。

3.3.2 滑坡灾害暴露度评估

利用同样的方法计算得到滑坡的暴露度区划图如图 3 所示。由图 3 可知，高暴露度区域也集中在澳门特别行政区、广州市越秀区、天河区和深圳市福田区，与暴雨灾害暴露度一致。因为地均 GDP 和人口密度这 2 个指标无论是在暴雨还是滑坡灾害中重要性都排在前面，这 2 个指标也决定了受灾体的高暴露度。低暴露度区集中在德庆县、广宁县、广州市从化区等东、西部地区。这些地区的显著特征是地广人稀，灾害带来的潜在损失相对较小。

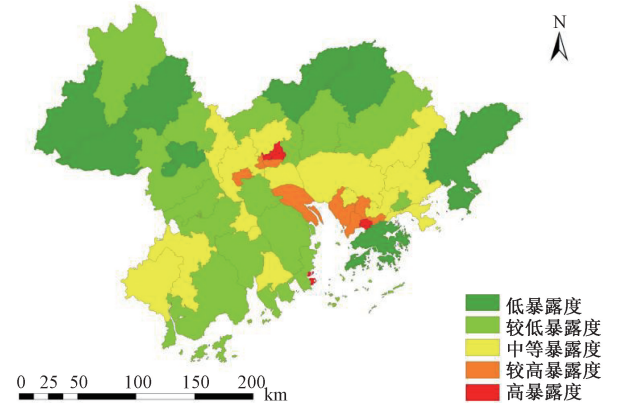


图 3 粤港澳大湾区滑坡灾害暴露度区划图

Figure 3 Landslide disaster exposure zoning map of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

3.3.3 暴雨-滑坡灾害链系统暴露度评估

根据潘元贵等^[19]对地震暴雨地质灾害特征及

叠加效应的分析,结合式(2),选取叠加系数 $g_1 = 1.5$,计算得到粤港澳大湾区 52 个区县暴雨-滑坡灾害链受灾体暴露度指数,绘制相应的暴露度区划图如图 4 所示。

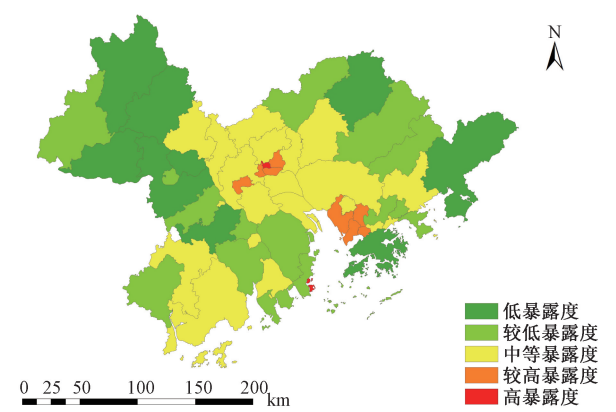


图 4 粤港澳大湾区暴雨-滑坡灾害链系统暴露度区划图
Figure 4 Rainstorm-landslide disaster chain exposure zoning map of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

由图 4 可看出,灾害链作用下各区县的整体暴露度有所上升。高暴露度区域集中在澳门特别行政区、广州市越秀区和深圳市福田区。不同区域的暴露度成因不同,如澳门特别行政区道路密度高、人口聚集程度大、地区经济发展较高、旅游业发展较好等因素造成其暴露度等级较高;而对于越秀区,其地均 GDP 和人口密度非常高,经济发达,作为广州政治、科技、教育、文化中心,产业格局高度发达且完善,因灾害而停工产生的潜在损失较大,暴露度高。较高暴露度区域如广州市荔湾区和天河区,6 项指标数值处于中等偏高水平,综合计算后暴露度指数较高;深圳市南山区的居住用地和工业用地开发强度高、资产量大,导致暴露度较高。由此可见,地均 GDP 和人口密度对于受灾体暴露度而言是影响力较高的两项指标。

而低暴露区集中在肇庆市德庆县、广宁县、封开县等地区。低暴露度区域特征基本一致,人口密度和地均 GDP 较低,这两项指标受灾害产生的影响较小。低暴露等级与当地的低农业暴露度、较低的经济水平不无关系。

根据上述研究结果可知,一般来说,发展水平较高地区的人口、建筑等受灾体高度集中,受灾体物理暴露度较高,而经济发展相对落后地区人口、建筑等受灾体相对散开,呈现出较低的暴露度。将暴雨灾害暴露度区划图和滑坡灾害暴露度区划图进行对比发现,滑坡灾害的暴露度指数普遍偏高,推测是耕地占比指标造成的影响。在暴雨灾害情形中,一些排

水优良的耕地可能会起到固定水质和减弱灾情之类的作用;而在滑坡灾害情形下,耕地占比较高可能意味着该区域对生态保护不足,森林资源减少,进而可能促使垄断森林的出现,存在较大风险,因此耕地多的区域的暴露度指数有所增加。暴雨-滑坡灾害链系统暴露度评估结果是将 2 个单灾种暴露度评估结果叠加而得,从最终的灾害链系统暴露度区划图图 4 可以看出,不同灾害情景下的地区的暴露程度的相对属性差别不大,但暴露指数相对单灾种是大幅增高的,这也说明复合灾害下受灾体遭受的损失是更大的。

4 结论

(1) 本文通过对链式复合灾害系统暴露度研究分析,综合考虑现有研究并界定了复合灾害系统暴露度的内涵,推导建立了链式复合灾害系统暴露度评价模型和计算方法。以粤港澳大湾区暴雨-滑坡灾害链为例进行实证分析,针对大湾区实际情况和数据可得性构建了复合灾害系统暴露度评估指标体系,计算并得到湾区暴露度区划图,评估结果与地域特征相符,验证了模型的有效性。

(2) 评估结果显示高暴露区相对集中在经济发达地区,其地均 GDP 高于平均水平,人口密度较大,路网发达。对于这些地区,应当注重防灾减灾措施,一方面要加大对于应急管理部门的投入,加强应急仓库的建设。相比于由于灾害而导致停工拉低 GDP 水平,前期加大防灾减灾工作的投入能有效降低灾损。另一方面要加强宣传教育,提高公众对灾害的认识。灾害暴露度评估结果可以向公众传达灾害风险信息,充分利用新媒体信息化平台,最大程度避免灾害时由于错误避险行为带来的人员伤亡。

(3) 对于一些经济相对落后的低暴露区,其共同特征是耕地面积相对较大。作为经济收入来源的一部分,应采取措施提高此类区域的整体安全性以降低经济损失。例如,对于以农耕为主要收入来源的地区,采用水土保持、坡改梯、植树造林等方法,对水文灾害加以综合治理。同时,应健全灾害预警系统,及时向居民发布灾害警报,尽量将人力物力损失降至最低;加强对自然灾害的监测和预测,如遭遇暴雨侵袭时重点关注地质灾害隐患点,制定应急预案,提高救灾效率。

(4) 通过对区域复合灾害系统暴露度的评估,可以预测灾害对该区域影响的严重程度,有助于政府和相关部门制定合理的防灾减灾措施,在城市发展规划中采取相应的建筑和基础设施设计措施以降

低灾害风险。此外,通过评估区域暴露度可以更好地分配资源以提高应对灾害的效率、降低灾损。成果可在华南沿海地区复合灾害系统暴露度评估工作中推广应用。未来可以从致灾因子和暴露度、适应性等角度进一步研究区域综合风险性的评估,为复合灾害系统脆弱性评估提供基础。

参考文献:

[1] NG K S, LECKEBUSCH G C. A new view on the risk of typhoon occurrence in the western North Pacific[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2021, 21(2): 663-682.

[2] 于文颖,纪瑞鹏,王鹏,等. 辽宁玉米典型复合农业气象灾害影响损失评估[J]. *灾害学*, 2022, 37(3): 84-92.

YU W Y, JI R P, WANG P, et al. Maize loss assessment of typical multiple agrometeorological disasters in Liaoning province, China[J]. *Journal of Catastrophology*, 2022, 37(3): 84-92.

[3] 刘曙光,郑伟强,周正正,等. 极端暴雨下城市地下空间洪涝风险及灾害防控[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2023, 44(2): 22-29, 81.

LIU S G, ZHENG W Q, ZHOU Z Z, et al. Flood risk and control in urban underground spaces with extreme rainfall[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2023, 44(2): 22-29, 81.

[4] 张金萍,张朝阳,左其亭. 极端暴雨下城市内涝模拟与应急响应能力评估[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2023, 44(2): 30-37.

ZHANG J P, ZHANG Z Y, ZUO Q T. Urban waterlogging simulation and emergency response capacity evaluation with extreme rainstorms[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2023, 44(2): 30-37.

[5] 朱雪虹. 顾及居民出行的城市洪涝灾害暴露性计算方法研究[D]. 南京:南京师范大学,2018.

ZHU X H. Research on calculation method of urban exposure to flood hazard considering residents' trip [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2018.

[6] POLSKY C, NEFF R, YARNAL B. Building comparable global change vulnerability assessments; the vulnerability scoping diagram [J]. *Global Environmental Change*, 2007, 17(3/4): 472-485.

[7] TELLMAN B, SULLIVAN J A, KUHN C, et al. Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods[J]. *Nature*, 2021, 596(7870): 80-86.

[8] SUN H M, WANG Y J, CHEN J, et al. Exposure of population to droughts in the Haihe River Basin under global warming of 1.5 and 2.0℃ scenarios[J]. *Quaternary International*, 2017, 453: 74-84.

[9] 王艳君,高超,王安乾,等. 中国暴雨洪涝灾害的暴露度与脆弱性时空变化特征[J]. *气候变化研究进展*, 2014, 10(6): 391-398.

WANG Y J, GAO C, WANG A Q, et al. Temporal and spatial variation of exposure and vulnerability of flood disaster in China[J]. *Climate Change Research*, 2014, 10(6): 391-398.

[10] 谢伏瞻,刘雅鸣. 应对气候变化报告(2019): 防范气候风险[M]. 北京:社会科学文献出版社,2019.

XIE F Z, LIU Y M. Annual report on actions to address climate change (2019): climate risk prevention [M]. Beijing: Social Science Academic Press, 2019.

[11] 张柳红,伍红雨,向昆仑,等. 1961—2021 年粤港澳大湾区暴雨气候变化特征[J]. *中山大学学报(自然科学版)(中英文)*, 2023, 62(4): 32-44.

ZHANG L H, WU H Y, XIANG K L, et al. Climate change characteristics of rainstorm in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1961 to 2021 [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2023, 62(4): 32-44.

[12] 薛斯文,解雪峰,吴涛,等. 杭州城市边缘区暴露度评价[J]. *农学报*, 2022, 12(5): 85-90.

XUE S W, XIE X F, WU T, et al. Exposure degree evaluation of urban fringe in Hangzhou[J]. *Journal of Agriculture*, 2022, 12(5): 85-90.

[13] 闫康子. 暴露度研究综述[J]. *农业灾害研究*, 2023, 13(2): 169-172.

YAN K Z. Review of exposure research [J]. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 2023, 13(2): 169-172.

[14] CLARK G E, MOSER S C, RATICK S J, et al. Assessing the vulnerability of coastal communities to extreme storms: the case of Revere, MA., USA[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 1998, 3(1): 59-82.

[15] 广东省统计局. 广东统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2020.

Statistics Bureau of Guangdong Province. Guangdong statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.

[16] 郭亚军. 综合评价理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2002.

GUO Y J. Theory and method of comprehensive evaluation[M]. Beijing: Science Press, 2002.

[17] 董文旭,王方明,王芳,等. 三种赋权法在应急准备能力评估领域的适用性对比分析研究[J]. *计算机与应用化学*, 2018, 35(9): 725-731.

DONG W X, WANG F M, WANG F, et al. A comparative study on applicability of three weight assignment methods in the capability assessment for emergency readiness[J]. *Computers and Applied Chemistry*, 2018, 35(9): 725-731.

[18] 徐新良. 中国多年度区县行政区划边界数据[EB/OL]. [2023-08-10]. <https://www.resdc.cn/DOI/DOI.aspx? DOIID=120>.
XU X L. Multi-year administrative division boundary data of districts and counties in China[EB/OL]. [2023-08-10]. <https://www.resdc.cn/DOI/DOI.aspx? DOIID=120>.
[19] 潘元贵, 伍中庚, 孙东, 等. 四川渠县“8·8”特大暴雨引发的地质灾害分布特征与成因分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(4): 125-133.
PAN Y G, WU Z G, SUN D, et al. Analysis on the distributive characteristics and causes of the geological disasters induced by the “8·8” heavy rainstorm in Qu County, Sichuan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(4): 125-133.

Exposure Assessment of Compound Disaster System in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

HUANG Li^{1,2}, WANG Yunqing³, WANG Wei^{2,3}, SONG Yue^{2,3}, SHI Yuxin³

(1. School of Public Administration, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Coastal Disaster and Protection, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to prevent and reduce the disaster losses caused by compound disasters to cities, it was of great theoretical and practical significance to study the exposure degree of chain compound disaster system. Through the research and analysis of the exposure degree of chain compound disaster system, considering the existing research and defining the connotation of the exposure degree of the compound disaster system, the evaluation model and calculation method of the exposure degree of the chain compound disaster system were deduced and established. Taking the rainstorm-landslide disaster chain in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area as an example for empirical analysis, the evaluation index system of regional disaster chain exposure was screened and constructed from the aspects of population, economy and society. The order relationship analysis and TOPSIS method were used to calculate the single disaster exposure index of rainstorm and landslide in 52 districts and counties in the bay area. Then, the theoretical model of exposure degree of chain compound disaster system and ArcGIS image processing technology were used to obtain the zoning map of rainstorm-landslide disaster chain exposure in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, and the corresponding disaster prevention and mitigation measures were put forward according to the exposure degree attribute of each regional disaster chain. The results showed that the exposure index corresponding to the economically developed areas was significantly higher than that of other regions, and the low exposure were mainly in the relatively backward areas. Among the indicators, population density and GDP per land area account for the main position, which had the highest impact on regional exposure. By the exposure of regional compound disaster systems, reasonable scientific basis and decision-making support could serve for the government and relevant departments, helping the government, urban planners, and the public better understand and respond to disaster risks, thereby reduce the losses and impacts of disasters.

Keywords: compound disasters; Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area; exposure evaluation; order relationship analysis; TOPSIS method